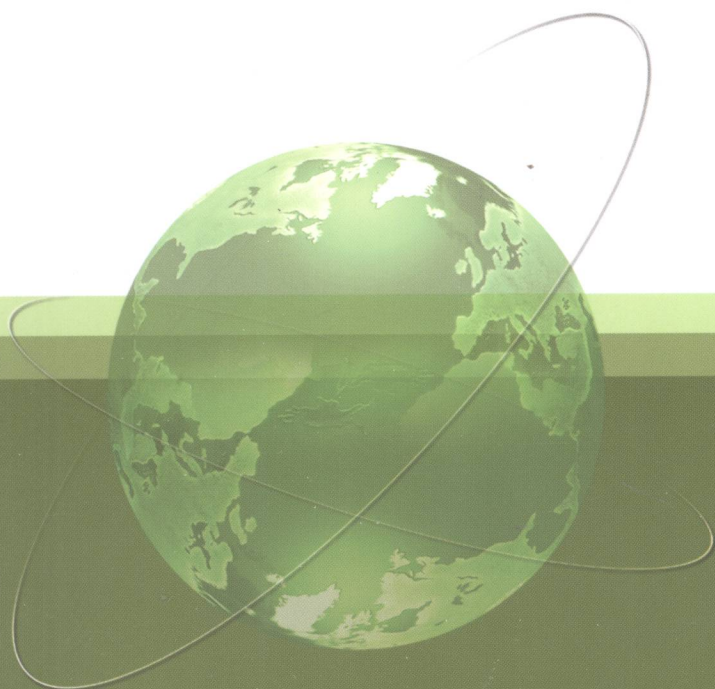




高等职业教育“十二五”规划教材
21世纪高职高专规划教材 (机械类)

金属材料 与热处理



王晓丽 主编



高等职业教育“十二五”规划教材
21 世纪高职高专规划教材（机械类）

金属材料与热处理

主 编 王晓丽

副主编 孙 敏 王晓东

参 编 彭继华 周 丽 初立新 何文萍



机械工业出版社

本书是为高等职业技术学院和高等专科学校的冶金类和机械类专业编写的教材。本书在编写过程中充分突出了职业技术教育的特点,在内容安排上尽量选择与生产实践相关的题材。

本书主要讲授金属学、金属材料及热处理方面的基本知识,并介绍了机械工业常用非金属材料及新型材料。内容包括金属材料的性能、金属的晶体结构与结晶、合金的相结构与结晶、铁碳合金相图、金属的塑性变形与再结晶、钢的热处理、碳素结构钢、碳素工具钢、合金结构钢、合金工具钢、特殊性能钢、铸铁、非铁金属、粉末冶金非金属材料、新型材料、机械零件的毛坯选择与质量检验。为加深理解和学用结合,每章都附有复习思考题。

本书可作为高等职业院校和高等专科学校的材料成形、焊接以及机械制造类专业教材,也可作为成人大专、职工培训和继续教育教材,并可供工程技术人员参考。

为方便教学,本书配备电子课件等教学资源。凡选用本书作为教材的教师均可登录机械工业出版社教材服务网 www.cmpedu.com 注册后免费下载。如有问题请致信 cmpgaozhi@sina.com,或致电 010-88379375 联系营销人员。

图书在版编目(CIP)数据

金属材料与热处理/王晓丽主编. —北京:机械工业出版社, 2012.3

高等职业教育“十二五”规划教材 21世纪高职高专规划教材. 机械类

ISBN 978-7-111-37510-4

I. ①金… II. ①王… III. ①金属材料-高等职业教育-教材②热处理-高等职业教育-教材 IV. ①TG14②TG15

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第028073号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:余茂祚 责任编辑:吕芳

版式设计:霍永明 责任校对:程俊巧

责任印制:杨曦

北京京丰印刷厂印刷

2012年6月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·16.75印张·393千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-37510-4

定价:32.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
电话服务 网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

21 世纪高职高专规划教材 编 委 会 名 单

编委会主任 王文斌

编委会副主任 (按姓氏笔画为序)

王建明	王明耀	王胜利	王寅仓	王锡铭
刘 义	刘晶磷	刘锡奇	杜建根	李向东
李兴旺	李居参	李麟书	杨国祥	余党军
张建华	茆有柏	赵居礼	秦建华	唐汝元
谈向群	符宁平	蒋国良	薛世山	

编委会委员 (按姓氏笔画为序, 黑体字为常务编委)

王若明	田建敏	成运花	曲昭仲	朱 强
刘 莹	刘学应	孙 刚	许 展	严安云
李学锋	李选芒	李超群	杨 颀	杨群祥
杨翠明	吴 锐	何志祥	何宝文	余元冠
沈国良	宋岳英	张 波	张 锋	张福臣
陈月波	陈向平	陈江伟	武友德	郑晓峰
林 钢	周国良	赵红英	赵建武	俞庆生
晏初宏	倪依纯	徐炳亭	徐铮颖	韩学军
崔 平	崔景茂	焦 斌	戴建坤	

总 策 划 余茂祚

前言

本书是为了适应高职高专冶金类和机械类专业的教学需要编写的。本书采用我国材料方面的最新标准,更好地实现了与国际接轨。通过本课程的学习,可获得常用工程材料与零件成形加工的基本知识,为后续课程的学习和今后从事材料加工和机械设计及制造奠定必要的基础,同时对拓宽专业面、培养复合型人才,满足市场对人才的需求,起到不可缺少的重要作用。

本书从机械工程材料的应用角度出发,阐明工程材料及其成形工艺的基础原理、基本知识和技能,注重分析材料的化学成分、加工工艺、组织结构与性能之间的关系。本书内容体系注重厚基础、宽口径、重技能,并进行了教学体系、教学内容、教学方法和实践教学模式的全面革新,在保证教学内容基础性和实践性原则下,以培养学生的创新能力和解决实际问题的能力为主线,在融合传统的“金属学”、“金属材料及热处理”、“金属工艺学”等有关课程的基础上,拓展了非金属材料与新型材料的知识。

本书知识面广、综合性强、适用范围广,可作为金属材料工程、材料成形及控制、机械设计及自动化、测控技术与仪器等专科专业教材,也可供有关工程技术人员参考。其适用教学学时数为72学时,使用时可结合各专业的具体情况进行调整,有些内容可供学生自学。

本书由王晓丽担任主编,孙敏、王晓东担任副主编。本书共13章,参加本书编写的有:包头钢铁职业技术学院王晓丽(1、4、10、12、13章,7、11章部分内容),包头职业技术学院孙敏(8、9章),内蒙古科技大学高等职业技术学院王晓东(5、6章),内蒙古科技大学高等职业技术学院彭继华(2、3章),包头钢铁职业技术学院周丽(11章部分内容),包头钢铁职业技术学院初立新(绪论),包头钢铁职业技术学院何文萍(7章部分内容)。全书由王晓丽统稿。

本书电子课件由包头钢铁职业技术学院王晓丽制作。

由于编者水平有限,时间仓促,书中难免存在不少缺点,敬请广大读者批评指正。

编者

目 录

前言

绪论	1
----	---

第1章 金属材料的性能

1.1 金属材料的力学性能	3
1.1.1 强度指标	3
1.1.2 刚度指标	6
1.1.3 塑性指标	7
1.1.4 韧性指标	7
1.1.5 硬度指标	9
1.2 金属材料的物理和化学性能	12
1.2.1 物理性能	12
1.2.2 化学性能	13
1.3 金属材料的工艺性能	14
复习思考题	15

第2章 金属的晶体结构与结晶

2.1 金属的晶体结构	16
2.1.1 金属	16
2.1.2 晶体与非晶体	18
2.1.3 金属的晶体结构	18
2.2 实际金属的结构	25
2.2.1 单晶、多晶和非晶态	25
2.2.2 晶体缺陷	26
2.3 纯金属的结晶	33
2.3.1 结晶过程的现象	33
2.3.2 金属结晶的热力学条件	34
2.3.3 金属结晶的结晶条件	35
2.3.4 晶核的形成	35
2.3.5 晶核的长大	36
2.4 金属铸锭组织与缺陷	39
2.4.1 金属铸锭组织	40
2.4.2 铸锭缺陷	43
复习思考题	44

第3章 合金的相结构与结晶

3.1 合金中的相结构	45
3.1.1 固溶体	45
3.1.2 金属化合物	46
3.2 二元合金相图	46

3.2.1 二元合金相图的建立	46
3.2.2 相律及杠杆定律	47
3.2.3 匀晶相图及固溶体的结晶	49
3.2.4 共晶相图及其合金的结晶	51
3.2.5 包晶相图及其合金的结晶	53
3.3 相图与合金性能的关系	54
3.3.1 相图与合金力学性能及物理性能的关系	55
3.3.2 相图与合金铸造性能的关系	55
复习思考题	56

第4章 铁碳合金相图

4.1 铁碳合金的结构及相图	57
4.1.1 铁碳合金的基本组元和基本相	57
4.1.2 Fe-Fe ₃ C 相图分析	58
4.1.3 典型铁碳合金的结晶过程分析	60
4.2 铁碳合金相图的应用	64
4.2.1 含碳量、组织与力学性能的关系	64
4.2.2 铁碳合金相图的应用	65
复习思考题	66

第5章 金属的塑性变形与再结晶

5.1 金属的塑性变形与断裂	68
5.1.1 单晶体的塑性变形	68
5.1.2 多晶体的塑性变形	71
5.1.3 合金的塑性变形	72
5.1.4 金属的断裂	73
5.2 金属在塑性加工中组织和性能的变化	75
5.2.1 金属在冷塑性加工中组织和性能的变化	75
5.2.2 冷塑性加工金属在加热时组织和性能的变化	77
5.2.3 金属在热塑性加工中组织和性能的变化	84
复习思考题	90

第6章 钢的热处理	92	8.4 合金工具钢	163
6.1 钢的热处理原理	92	8.4.1 合金刀具钢	164
6.1.1 钢在加热时的转变	92	8.4.2 合金模具钢	168
6.1.2 钢在冷却时的转变	96	8.4.3 合金量具钢	171
6.1.3 淬火钢在回火时的转变	110	8.5 特殊性能钢	172
6.2 钢的热处理工艺	114	8.5.1 不锈钢	172
6.2.1 钢的退火与正火	114	8.5.2 耐热钢	175
6.2.2 钢的淬火与回火	119	8.5.3 耐磨钢	177
6.2.3 钢的表面热处理	127	复习思考题	177
6.2.4 钢的形变热处理和钢的控制 轧制与控制冷却	130	第9章 铸铁	180
复习思考题	133	9.1 铸铁的石墨化	181
第7章 碳素钢	135	9.1.1 铁碳合金双重相图	181
7.1 常存杂质元素对碳素钢性能的 影响	135	9.1.2 铸铁的石墨化过程	181
7.1.1 锰的影响	135	9.1.3 影响石墨化的因素	182
7.1.2 硅的影响	135	9.2 灰铸铁	184
7.1.3 硫的影响	135	9.2.1 灰铸铁的化学成分、组织和 性能	184
7.1.4 磷的影响	136	9.2.2 灰铸铁的孕育处理	186
7.2 碳素钢的分类与牌号	136	9.2.3 灰铸铁的牌号及应用	187
7.2.1 碳素钢的分类	136	9.2.4 灰铸铁的热处理	189
7.2.2 普通碳素结构钢的牌号	137	9.3 球墨铸铁	190
7.2.3 优质碳素结构钢的牌号	138	9.3.1 球墨铸铁的化学成分、组织和 性能	190
7.3 碳素结构钢	139	9.3.2 球墨铸铁的牌号	191
7.3.1 普通碳素结构钢	139	9.3.3 球墨铸铁的热处理	192
7.3.2 优质碳素结构钢	139	9.4 蠕墨铸铁	196
7.4 碳素工具钢	140	9.4.1 蠕墨铸铁的力学性能特点	196
复习思考题	140	9.4.2 其他性能特点	196
第8章 合金钢	141	9.5 可锻铸铁	197
8.1 合金元素在钢中的存在形式及对 铁-渗碳体相图、热处理的影响	141	9.5.1 可锻铸铁的组织	197
8.1.1 合金元素在钢中的存在形式	141	9.5.2 可锻铸铁的牌号	198
8.1.2 合金元素对铁-渗碳体相图的 影响	142	9.5.3 可锻铸铁的性能及用途	199
8.1.3 合金元素对钢热处理的影响	143	9.5.4 可锻铸铁的热处理	200
8.2 合金钢的分类和编号	147	9.6 特殊性能铸铁	201
8.2.1 合金钢的分类	147	9.6.1 耐热铸铁	201
8.2.2 合金钢的编号	147	9.6.2 耐蚀铸铁	202
8.3 合金结构钢	153	9.6.3 抗磨白口铸铁	203
8.3.1 低合金高强度结构钢	153	复习思考题	204
8.3.2 普通低合金结构钢的种类	155	第10章 非铁金属材料	205
		10.1 铝及其合金	205
		10.1.1 工业纯铝	205
		10.1.2 铝合金	205
		10.2 铜及其合金	211

10.2.1 工业纯铜	211	11.3.2 复合材料的种类	234
10.2.2 铜合金	212	11.3.3 复合材料的性能特点	236
10.3 钛及其合金	216	复习思考题	237
10.3.1 工业纯钛	216	第12章 新型材料	238
10.3.2 钛合金	217	12.1 纳米材料	238
10.4 镁及其合金	219	12.2 超导材料	239
10.4.1 工业纯镁	219	12.3 形状记忆合金	240
10.4.2 镁合金	220	12.4 非晶态合金	241
10.5 轴承合金	221	12.5 磁性材料	242
10.5.1 轴承合金的组织 and 性能	221	12.6 智能材料	243
10.5.2 常用的轴承合金	222	12.7 梯度功能材料	244
10.6 粉末冶金材料	224	12.8 功能复合材料	245
复习思考题	226	复习思考题	247
第11章 非金属材料	227	第13章 机械零件材料的选择	248
11.1 高分子材料	227	13.1 零件的失效	248
11.1.1 塑料	227	13.2 机械零件的材料选择原则	249
11.1.2 橡胶	230	13.3 典型零件选材及工艺分析	252
11.2 陶瓷材料	231	13.3.1 齿轮类	252
11.2.1 陶瓷的分类	231	13.3.2 轴类	253
11.2.2 陶瓷材料的组织结构	232	复习思考题	256
11.2.3 陶瓷材料的性能特点	232	参考文献	257
11.3 复合材料	233		
11.3.1 复合材料强化原理	233		

绪 论

1. 材料的发展与应用

材料是人类生产和社会发展的重要物质基础，与人类文明的关系非常密切。人类最早使用的材料是石头、泥土、树枝、兽皮等天然材料，随后发明了陶器、瓷器、青铜器、铁器。因此在人类文明史上曾以材料作为划分时代的标志，如石器时代、青铜时代、铁器时代等。在 20 世纪 60 年代，人们把材料、能源、信息并列称为现代技术和现代文明的三大支柱，70 年代又把新材料、信息技术和生物技术列为新技术革命的主要标志。这都说明，材料的应用和发展与社会文明进步有着十分密切的关系。

但是，由于材料涉及多种基础学科且种类繁多，还受社会制度和环境等多种因素的制约，所以到 18~19 世纪工业革命时期，人类对材料的认识仍停留在工匠或艺人的经验技术水平上。18 世纪后，随着现代工业迅速发展，对钢铁的需求急速增长，才逐渐在化学、物理、力学及冶金等学科基础上产生了一门新学科——金属学。它明确提出了金属的外在性能取决于内部组织结构的概念，其主要任务是研究成分、组织结构与性能之间的关系和变化的规律。

材料科学主要研究的是材料的化学组成、微观组织、加工制造工艺与性能之间的关系。它以化学、固体物理、力学等为基础，是一门多学科交叉的边缘科学。材料经历了从低级到高级、从简单到复杂、从天然到合成的发展历程。近半个世纪以来，材料的研究和生产以及材料科学理论都得到了迅速的发展。1863 年第一台金相光学显微镜面世，促进了金相学的研究，使人们步入材料的微观世界。同时，一些与材料有关的基础学科（如固体物理、量子力学、化学等）的发展，又更有力地推动了材料研究的深化。

随着金属材料的发展，一些非金属材料、复合材料也迅速发展起来，弥补了金属材料性能的某些不足。到 70 年代中期，全世界的有机合成材料和钢的体积产量已经相等；除了用作结构材料代替钢铁外，目前正在研究和开发具有良好导电性能和耐高温的有机合成材料。陶瓷材料的发展同样引人注目，它除了作为重要的功能材料（例如可作光导纤维、激光晶体）以外，其脆性和热震性正在逐步获得改善，是最有前途的高温结构材料。复合材料具备的优异性能使得其被广泛应用于宇航、航空工业和交通运输工业中，制造卫星壳体、飞机机身、螺旋桨、发动机叶轮和汽车车身等。在不久的将来，人工合成材料将得到较大的发展，并进入金属、高分子、陶瓷及复合材料共存的时代。

除结构材料外，功能材料也在迅速发展，如高温超导材料、激光材料、磁性材料、电子材料、形状记忆材料等。材料科学技术的发展和应用极大地促进了机械制造业的飞跃。现代设计与制造的机械已不是原来意义上的单纯机械了，已经发展到机电一体化的阶段，将来也可能把某些功能材料纳入机械工程材料之列。

近年来，我国在材料工业的生产和科研方面取得了巨大的成就，在金属材料的生产方面，已经形成了符合我国国情的系列产品，并能够生产具有世界先进水平的产品。我国的材料工业正蓬勃发展，但应该看到，我国在材料的制造技术、工艺和新材料的开发及应用方面

与世界上的发达国家之间还有一定的差距,因此,我们应该努力学习,争取尽快赶超世界材料工业方面的先进水平。

2. 本课程的内容、学习目的和方法

随着经济的飞速发展和科学技术的进步,对材料的要求越来越苛刻。结构材料向高强度、高刚度、高韧性、耐高温、耐腐蚀和多功能的方向发展,新材料也在不断地涌现。机械工业是材料应用的重要领域,机械工业的发展,对产品的要求越来越高。无论是制造机床,还是建造轮船、石油化工设备,都要求产品技术先进、质量高、寿命长、造价低。因此,在产品设计与制造过程中,会遇到越来越多的材料及材料加工方面的问题,这就要求机械工程技术掌握必要的材料科学与材料工程知识,具备正确选择材料和加工方法、合理安排加工工艺路线的能力。本课程正是为实现这一目标而设置的。

“金属材料及热处理”这门课程的内容包括金属学基础及热处理、机械工程常用的金属材料、非金属材料(高分子材料、陶瓷材料和复合材料)、新型材料和零件毛坯的选用。主要讲授工程构件和机器零件用材料的成分、组织结构和性能之间的关系、变化规律和改变材料性能的途径等。

学习本课程的目的使学生获得有关工程材料的基本理论和基本知识,初步掌握零件设计时的合理选材、用材,并具有正确运用热处理技术、妥善安排加工工艺路线及材料检测等方面的知识和能力。

本课程的名词概念较多,较为抽象和分散,初学者颇难掌握。但是,只要认真弄清其基本理论及重要名词、概念,按照材料成分、工艺、组织结构及性能变化规律进行认真学习、记忆,注重理解、分析和综合应用,多联系生产实践,认真完成习题、实验等教学环节,入门也是不难的。学习本课程之前,学生应具备必要的专业基础知识和生产实践知识,所以本课程一般应安排在材料力学、金工实习等课程之后。同时,学习中需要改进思维方式,调整和改进学习方法,注重主动学习、自主学习、提高学习效率;还应注意运用已学过的知识,注重分析、理解与应用,特别是注意前后知识的综合运用,把相对分散、孤立的材料科学知识转变为系统而整体的理论体系,培养独立分析问题与解决问题的能力。

第1章 金属材料的性能

至今为止,金属材料仍然是现代工业、农业、科技以及国防各个领域应用最广泛的工程材料,这不仅是由于金属材料来源丰富、生产工艺简单而且成熟,还因为它的一些性能大大优于某些非金属材料。本书主要以金属材料为例来阐述工程材料的一般性能及其主要指标。

金属材料的性能,主要是用来表征材料在给定外界条件下的行为参量,当外界条件发生变化时,同一种材料的某些性能也会随之发生变化。金属材料的性能对零件的使用和加工有十分重要的作用,一般可分为使用性能和工艺性能两大类。

(1) 使用性能 即为了保证零件、工程构件或工具等的正常工作,材料在使用过程中表现出来的性能,包括力学、物理、化学等方面的性能。金属材料的使用性能决定了其应用范围、安全可靠性和使用寿命等。

(2) 工艺性能 即反映材料在被制成各种零件、构件和工具的过程中,适应各种加工工艺的能力。它包括铸造性能、锻造性能、焊接性能、可加工性和热处理工艺性能等。

这里主要介绍金属材料的力学性能,并简单介绍其物理、化学性能及金属材料的工艺性能。

1.1 金属材料的力学性能

金属材料在加工和使用过程中都要承受不同形式外力的作用,当外力达到或超过某一限度时,材料就会发生变形,甚至断裂。材料的力学性能是指材料在各种载荷(外力)作用下表现出来的抵抗变形和破坏的能力以及接受变形的能力。由于载荷的形式不同,材料可表现出不同的力学性能,如强度、刚度、硬度、塑性和韧性等。材料的力学性能是零件设计、材料选择及工艺评定的主要依据。

1.1.1 强度指标

强度是指材料在外力作用下抵抗塑性变形或断裂的能力。由于所受载荷的形式不同,金属材料的强度可分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度和抗剪强度等。其中以拉伸试验所得到的强度指标应用最为广泛。按 GB/T 228—2002 的规定,把一定尺寸和形状的金属试样(见图 1-1)装夹在试验机上,然后对试样逐渐施加拉伸载荷,直至把试样拉断为止,根据试样在拉伸过程中承受的载荷和产生的变形量之间的关系,可测出该金属的应力-应变曲线(见图 1-2)。

无论哪种固体材料,它的内部原子之间都存在相互平衡的原子结合力的相互作用。当工件材料受外力作用时,原来的平衡就会受到破坏,材料中任意一个小单元与其邻近的各小单元之间就产生了新的力,称为内力。在单位截面上的内力,称为应力,用 R 表示。工程上用符号 R 表示材料的工程应力。在外力作用下引起的形状和尺寸的改变,称为变形,包括

弹性变形（卸载后可恢复原来的形状和尺寸）和塑性变形（卸载后不能恢复原来的形状和尺寸）。

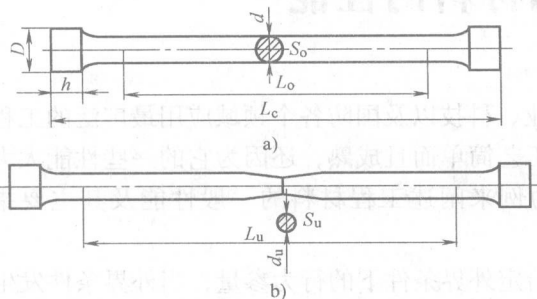


图 1-1 拉伸试样

a) 拉伸前 b) 拉伸后

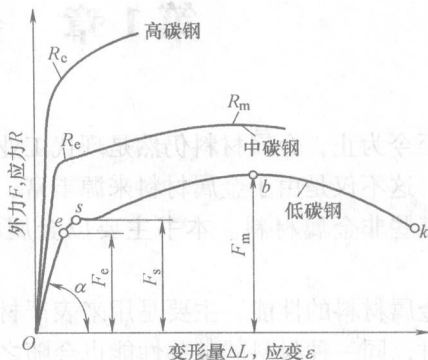


图 1-2 低碳钢的应力-应变曲线

1. 弹性极限 (σ_e)

从图 1-2 可以看出，不同性质材料的应力-应变曲线形状是不相同的。应力-应变曲线 Oe 段是直线，这一部分试样变形量与外力 F 成正比。当去除外力后，试样恢复到原来尺寸，称这一阶段的变形为弹性变形。外力 F_e 是使试样只产生弹性变形的最大载荷。

弹性极限是指材料产生弹性变形所承受的最大应力值。弹性极限用符号 σ_e 表示，单位为 MPa (N/mm^2)，即

$$\sigma_e = \frac{F_e}{S_0}$$

式中 S_0 ——试样的原始截面积 (mm^2)；

F_e ——试样完全弹性变形时所能承受的最大载荷 (N)。

弹性极限 σ_e 是由试验得到的，它的值受测量精度影响很大。为方便实际测量和应用，一般规定以残余应变量为（微量塑性变形量）为 0.01% 时的应力值 ($\sigma_{0.01}$) 为“规定弹性极限”。

2. 屈服强度 (R_e)

从应力-应变曲线上可以看到，当载荷增加至超过 F_e 后，试样保留部分不能恢复的残余变形，即塑性变形。在外力达 F_s 时，曲线出现一个小平台。此平台表明不增加载荷试样仍然继续变形，这时材料失去抵抗外力的能力而屈服。我们称试样屈服时的应力为材料的屈服强度，按 GB/T 10623—2008 的规定，用 R_e 表示，单位为 MPa，即

$$R_e = \frac{F_s}{S_0}$$

式中 F_s ——试样发生屈服时承受的载荷 (N)；

S_0 ——试样的原始截面积 (mm^2)。

很多金属材料，如多数合金钢、铜合金以及铝合金，它的应力-应变曲线不会出现平台。而一些脆性材料，如普通铸铁、镁合金等，甚至断裂之前也不发生塑性变形，因此工程上规

定试样发生某一微量塑性变形（规定残余延伸率为0.2%）时的应力作为该材料的屈服强度，即“规定残余延伸强度”，记作 $R_{0.2}$ 。

3. 抗拉强度（ R_m ）

试样在屈服时，由于塑性变形而产生加工硬化，所以只有载荷继续增大时变形才能继续增大，直到增至最大载荷 F_m 。应力-应变曲线的这一阶段，试样沿整个长度均匀伸长，当载荷达到 F_m 后，试样就在某个薄弱部位形成“缩颈”，如图1-1b所示。这时不增加载荷试样也会发生断裂。 F_m 是试样承受的最大外力，相应的应力即为材料的抗拉强度，按GB/T 10623—2008的规定，用 R_m 表示，单位为MPa，它代表金属材料抵抗大量塑性变形的能力，即

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

式中 F_m ——试样在屈服阶段之后所能抵抗的最大载荷，对于无明显屈服（连续屈服）的金属

材料，为试验期间的最大载荷（N）；

S_0 ——试样的原始截面积（ mm^2 ）。

抗拉强度是工程上最重要的力学性能指标之一。对于塑性较好的材料， R_m 表示了对最大均匀变形的抗力。对于塑性较差的材料，一旦达到最大载荷，材料便迅速发生断裂，所以 R_m 也是材料的断裂抗力（断裂强度）指标。一般机器构件都是在弹性状态下工作的，不允许微小的塑性变形，所以在机械设计时应采用 R_e 或 $R_{0.2}$ 强度指标，并加上适当的安全系数。但由于抗拉强度 R_m 测定较方便，而且数据也较准确，所以设计零件时有时也可以直接采用抗拉强度 R_m ，但需使用较大的安全系数。

R_e/R_m 的比值称为屈强比，是一个有意义的指标。比值越大，越能发挥材料的潜力，减小结构的自重。但为了使用安全也不宜过大，适合的比值在0.65~0.75之间。

4. 疲劳强度（ S ）

许多机械零件是在交变应力下工作的，如机床主轴、连杆、齿轮、弹簧、各种滚动轴承等。交变应力，是指零件所受应力的方向和大小随时间做周期性变化。例如，受力发生弯曲的轴，在转动时材料要反复受到拉应力和压应力，属于对称交变应力循环。零件在交变应力作用下，当交变应力值远低于材料的屈服强度时，经长时间运行后也会发生破坏，材料在这种应力作用下发生的断裂现象称为疲劳断裂。

疲劳断裂往往突然发生，无论是塑性材料还是脆性材料，断裂时都不产生明显的塑性变形，具有很大的危险性，常常会造成事故。

金属材料的疲劳破坏过程，首先是在其薄弱部位，如有应力集中或缺陷（划伤、夹渣、显微裂纹等）处产生微细裂纹。这种裂纹是疲劳源，并且一般会出现在零件表面上，形成裂纹扩展区。当裂纹扩展区达到某一临界尺寸时，零件甚至会在低于弹性极限的应力下突然脆断。最后的脆断区称为最终破断区。如图1-3a所示为典型疲劳断口（汽车后轴）的宏观照片，而如图1-3b所示为典型断口三个区域的示意图。

材料抵抗疲劳破坏的能力由疲劳试验获得。被测材料承受的交变应力与材料断裂前的应力循环次数之间的关系曲线可以用如图1-4所示的材料的疲劳曲线描述。按GB/T 10623—2008的规定，材料疲劳强度用 S 表示， N 表示交变应力循环次数，对称应力循环时的疲劳

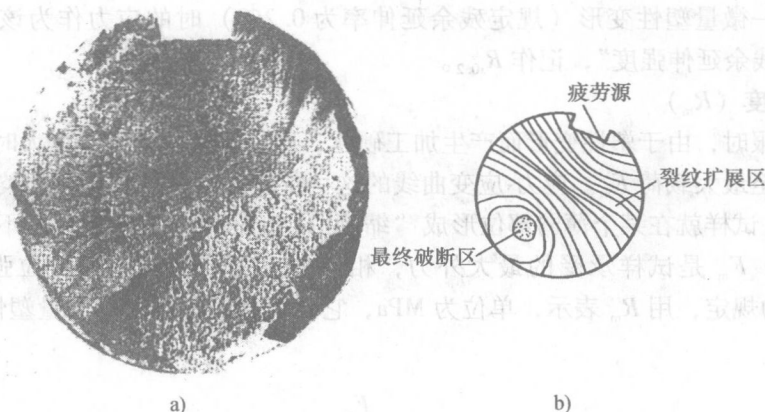


图 1-3 疲劳断口的特征

a) 汽车后轴的断口 b) 断口的示意图

极限用 σ_{-1} 表示。由于无数次应力循环难以实现, 规定钢铁材料经受 10^7 次循环, 非铁金属经受 10^8 次循环时的应力值确定为 σ_N 。一般认为, 产生疲劳破坏的原因是材料的某些缺陷, 如夹杂物、气孔等所致。在交变应力下, 缺陷处首先形成微小裂纹, 裂纹逐步扩展, 导致零件的受力截面减小, 以致突然产生破坏。零件表面的机械加工刀痕和构件截面突然变化部位, 都会产生应力集中。交变应力下, 应力集中容易处于产生显微裂纹处, 这也是产生疲劳破坏的主要原因。

在机械零件的断裂中, 80% 以上都属于疲劳断裂。为了防止或减少零件的疲劳破坏, 除应合理设计结构, 防止应力集中外, 还要尽量减小零件表面粗糙度值, 采取表面硬化处理等措施来提高材料的抗疲劳能力。

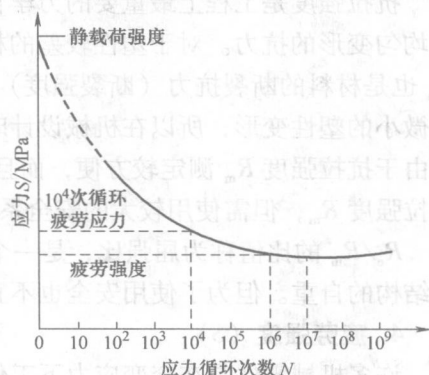


图 1-4 疲劳曲线图

1.1.2 刚度指标

材料在弹性范围内, 应力 σ 与应变 ε 的关系服从胡克定律: $\sigma = E\varepsilon$ (或 $\tau = G\gamma$)。 ε (或 γ) 为应变, 即单位长度的变形量, $\varepsilon = \Delta l / l$ 。

材料的刚度通常用弹性模量 E 来衡量。弹性模量指的是在应力-应变曲线上完全弹性变形阶段中应力与应变的比值, 即

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

因此刚度是指材料在受力时抵抗弹性变形的能力, 它表征了材料弹性变形的难易程度。 E 、 G 是表示材料抵抗弹性变形能力和衡量材料“刚度”的指标。弹性模量越大, 材料的刚度越大, 即具有一定外形尺寸的零件或构件保持其原有尺寸与形状的能力越大。

在设计机械零件时, 对要求刚度大的零件, 应选用具有高弹性模量的材料。例如镗床的

镗杆应有足够的刚度，如果刚度不足，当进给量大时镗杆的弹性变形就会大，镗出的孔就会偏小，进而影响加工精度。

常用金属的弹性模量和切变模量见表 1-1。

表 1-1 常用金属的弹性模量和切变模量

金 属	弹性模量 E/MPa	切变模量 G/MPa	金 属	弹性模量 E/MPa	切变模量 G/MPa
铁	214000	84000	铝	72000	27000
镍	210000	84000	铜	132400	49270
钛	118010	44670	镁	45000	18000

1.1.3 塑性指标

塑性是指金属材料在载荷作用下，断裂前发生不可恢复的永久变形的能力。评定材料塑性的指标通常是断后伸长率和断面收缩率。

1. 断后伸长率 (A)

按 GB/T 10623—2008 的规定，断后伸长率可用下式表示

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中 L_0 ——试样原标距长度 (mm)；

L_u ——拉断后试样的标距长度 (mm) (见图 1-1)。

材料断后伸长率的大小与试样原始标距 L_0 和原始截面积 S_0 密切相关。在 S_0 相同的情况下， L_0 越长则 A 越小；反之亦然。这里必须指出，同一金属材料的试样长度不同，测得的伸长率是不同的。一般把 $A > 5\%$ 的材料称为塑性材料， $A < 5\%$ 的材料称为脆性材料。铸铁是典型的脆性材料，而低碳钢是钢铁材料中塑性最好的材料。

2. 断面收缩率 (Z)

按 GB/T 10623—2008 的规定，断面收缩率用下式求得

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\%$$

式中 S_0 ——试样的原始截面积 (mm^2)；

S_u ——试样拉断后缩颈处的截面积 (mm^2) (见图 1-1)。

断面收缩率不受试样标距长度的影响，能更可靠地反映材料的塑性。对必须承受强烈变形的材料，塑性指标具有重要的意义。塑性优良的材料冷压成形性好。另外，重要的受力零件也要求具有一定的塑性，以防止超载时发生断裂。

1.1.4 韧性指标

1. 冲击吸收能量 (K)

以很大速度作用于机件上的载荷称为冲击载荷。许多零件和工具在工作过程中，经常会受到冲击载荷的作用，如蒸汽锤的锤杆、压力机上的某些部件、柴油机曲轴、飞机的起落架等。由于冲击载荷加载速度快、作用时间短，金属在受冲击时，应力分布与变形很不均匀，所以对承受冲击载荷的零件，仅具有足够的静载荷强度指标是不够的，还必须具有足够的抵

抗冲击载荷的能力。

按 GB/T 10623—2008 的规定,工程上常用夏比冲击试验来测定金属材料的冲击吸收能量。其试验原理如图 1-5 所示。

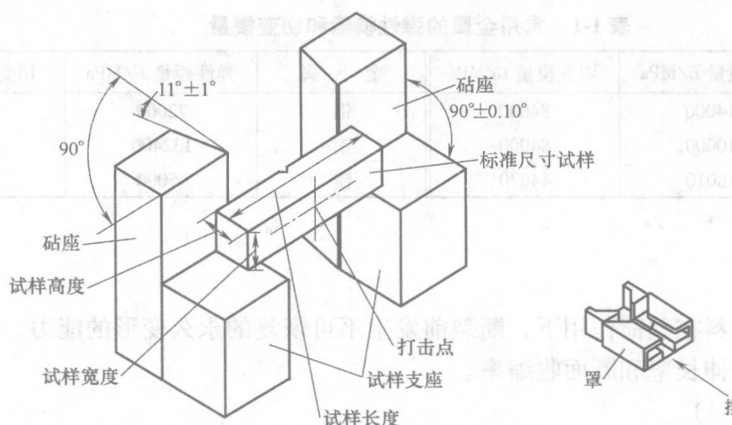


图 1-5 试样与摆锤冲击试验机支座及砧座相对位置示意图

先把要测定的材料加工成标准试样,然后把标准试样放在试验机的机架上,试样缺口背向打击面放置(见图 1-5),用摆锤一次打击试样,测定试样的冲击吸收能量,用 K (单位 J) 表示(注:用字母 V 和 U 表示缺口几何形状,用下标数字 2 或 8 表示摆锤刀刃半径,例如 KV_2)。冲击吸收能量表示方法见表 1-2。

表 1-2 冲击吸收能量表示方法

符 号	单 位	名 称
KU_2	J	U 型缺口试样在 2mm 摆锤刀刃下的冲击吸收能量
KU_8	J	U 型缺口试样在 8mm 摆锤刀刃下的冲击吸收能量
KV_2	J	V 型缺口试样在 2mm 摆锤刀刃下的冲击吸收能量
KV_8	J	V 型缺口试样在 8mm 摆锤刀刃下的冲击吸收能量

对一般常用钢材来说,所测冲击吸收能量 K 越大,材料的韧性越好。但由于测出的冲击吸收能量 K 的组成比较复杂,所以有时测得的 K 值不能真正反映材料的韧脆性质。

冲击吸收能量 K 的值越大,表示材料的冲击性能越好。在实际应用中许多受冲击件,往往是受到较小冲击能量的多次冲击而被破坏的,如凿岩机风镐上的活塞、冲模的冲头等,对于这类零件,应采用小能量多次冲击的抗力指标作为评定材料质量及选材的依据。

2. 断裂韧度 (K_{IC})

前面讨论的力学性能,均假定材料是均匀、连续、各向同性的。用这些假设为依据的设计方法称为常规设计方法。依据常规设计方法分析认为是安全的设计,有时也会发生意外断裂事故。在研究这些于高强度金属材料中发生的低应力脆性断裂的过程中,发现前述假设是不成立的。实际上,材料的组织并非是均匀、各向同性的,组织中有各种宏观缺陷,这些缺陷可看成是材料中的裂纹。当材料受外力作用时,这些裂纹的尖端附近就会出现应力集中,形成裂纹尖端应力场。裂纹前端附近应力场的强弱主要取决于一个力学参数,即应力强度因子 K_I ,单位为 $MN/m^{3/2}$,即

$$K_I = Y\sigma\sqrt{a}$$

式中 Y ——与裂纹形状、加载方式及试样尺寸有关的量，是个无量纲的系数；

σ ——外加拉应力 (MPa)；

a ——裂纹长度的一半 (m)。

对某一个有裂纹的试样 (或机件)，在拉伸外力作用下， Y 值是一定的。当外加拉应力逐渐增大，或裂纹逐渐扩展时，裂纹尖端的应力强度因子 K_I 也随之增大；当 K_I 增大到某一临界值时，试样 (或机件) 中的裂纹会产生突然失稳扩展，导致断裂。这个应力强度因子的临界值称为材料的断裂韧性，用 K_{IC} 表示。

断裂韧性是用来反映材料抵抗裂纹失稳扩展，即抵抗脆性断裂能力的性能指标。当 $K_I < K_{IC}$ 时，裂纹扩展很慢或不扩展；当 $K_I > K_{IC}$ 时，则材料发生失稳脆断。这是一项重要的判断依据，可用来分析和计算一些实际问题。断裂韧性是材料固有的力学性能指标，是强度和韧性的综合体现。它与裂纹的大小、形状、外加应力等无关，主要取决于材料的成分、内部组织和结构。

1.1.5 硬度指标

硬度是衡量材料软硬程度的指标，是材料抵抗比它更硬的物体压入的能力，因为硬度的测定总是在试样的表面上进行的，所以硬度也可以看做是材料表面抵抗变形的能力。实际上，硬度是金属材料力学性能的一个综合物理量，也就是说，在一定程度上，硬度高低也同时反映了金属材料的强度、塑性的大小。硬度是各种零件和工具必备的性能指标，硬度试验设备简单，操作方便，且不破坏被测试工件，因此广泛用于产品质量的检验。

常用的硬度表示法有布氏硬度 (HBW)、洛氏硬度 (HRA、HRB、HRC) 和维氏硬度 (HV) 三种。

1. 布氏硬度 (HBW)

布氏硬度试验方法是把规定直径的硬质合金球以一定的试验力压入所测材料表面 (见图 1-6)，保持规定时间后，测量表面压痕直径 (见图 1-7)，然后按下式计算硬度

$$HBW = 0.102 \frac{F}{A} = 0.102 \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

式中 HBW——硬质合金球试验时的布氏硬度值；

F ——试验力 (N)；

A ——压痕表面积 (mm^2)；

D ——球体直径 (mm)；

d ——压痕平均直径 (mm)。

由于金属材料有软有硬，被测工件有薄有厚，尺寸有大有小，如果只采用一种标准的试验力 F 和压头直径 D ，就会出现对某些材料和工件不适应的现象。因此，在进行布氏硬度试验时要求使用不同的试验力和压头直径，建立 F 和 D 的某种选配关系，以保证布氏硬度不变。

根据金属材料的种类、试样的硬度范围和厚度的不同，按照表 1-3 的规范选择试验压头直径 D 、试验力 F 及保持时间。